



COMMANDE NUMERIQUE OUVERTE : GENERATION DE TRAJECTOIRES “ ON-LINE ” DANS UN ENVIRONNEMENT DE PROGRAMMATION AVANCEE STEP-NC

Vincent Simoes, Matthieu Rauch, Jean-Yves Hascoët

► To cite this version:

Vincent Simoes, Matthieu Rauch, Jean-Yves Hascoët. COMMANDE NUMERIQUE OUVERTE : GENERATION DE TRAJECTOIRES “ ON-LINE ” DANS UN ENVIRONNEMENT DE PROGRAMMATION AVANCEE STEP-NC. MUGV 2014, Oct 2014, Clermont Ferrand, France. hal-01177439

HAL Id: hal-01177439

<https://hal.science/hal-01177439>

Submitted on 20 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMMANDE NUMERIQUE OUVERTE : GENERATION DE TRAJECTOIRES « ON-LINE » DANS UN ENVIRONNEMENT DE PROGRAMMATION AVANCEE STEP-NC

Vincent SIMOES
Matthieu RAUCH
Jean-Yves HASCOËT

École Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN),
UMR CNRS 6597,

1 rue de la Noe, BP92101, 44321 Nantes Cedex 03, France

E-mail: vincent.simoes@irccyn.ec-nantes.fr

E-mail: matthieu.rauch@irccyn.ec-nantes.fr

E-mail: jean-yves.hascoet@irccyn.ec-nantes.fr

Résumé :

De nombreux progrès technologiques sont observables dans plusieurs domaines en fabrication (structures des machines, procédés innovants, logiciels CAO/FAO) depuis une trentaine d'années mais relativement peu concernent la programmation destinée aux machines à commande numérique (MOCN). L'ensemble de l'industrie est encore basé sur une chaîne numérique hétérogène CAO/FAO/Commande Numérique (CN) et utilise des langages qui n'ont pas évolué depuis leur normalisation en 1980 (Code G – ISO 6983). Aux vues de l'arrivée des procédés émergents et la multiplication de machines à structure complexe, une importance croissante est portée à la prise en compte à la fois du moyen de fabrication, du process ainsi que du produit dans la génération de trajectoire, dans un but d'optimisation de la fabrication. Ce papier a pour originalité de présenter l'intérêt de combiner une commande numérique à structure ouverte et le langage émergent STEP-NC (ISO 14649) dans le but de générer des trajectoires optimales on-line.

Mots clés : CAO/FAO/CN – STEP-NC – Programmation avancée – CN ouverte – Trajectoire on-line – Commande adaptative

Abstract:

For thirty years, many technological progresses have been made in several manufacturing areas (structures of machines, new innovative processes, CAD/CAM software) but relatively sparsely about numerical control programming. The whole industry is still based on a heterogeneous digital chain CAD/CAM/Computer Numerical Control (CNC) and uses languages that have not evolved since their normalization in 1980 (G-code – ISO 6983). By considering the oncoming of emerging processes and the growing of complex structure machines, it becomes more and more relevant to take into account both the manufacturing equipment, the process and the product in the trajectory generation in order to optimize the manufacturing. This paper is original in presenting the interest of use both an open architecture CNC and emerging language STEP-NC (ISO 14649) in order to generate an optimal on-line trajectory.

Keywords: CAD/CAM/CNC – STEP-NC – Advanced programming – Open CNC – On-line trajectory – Adaptive Control

1 Introduction

Le contexte industriel actuel est caractérisé par le monopole d'utilisation d'une chaîne numérique cloisonnée et hétérogène CAO/FAO/CN qui laisse peu de possibilités d'optimisation de fabrication. Par ailleurs, l'arrivée de procédés émergents (tel que la fabrication additive ou le formage incrémental), ainsi que la multiplication de machines à structure complexe, amène à prendre de plus en plus en compte à la fois le produit, le moyen de fabrication ainsi que le process afin d'obtenir une trajectoire d'outil optimale.

Dans ce contexte, le choix a été fait de donner un rôle central à la programmation de CN et d'avoir une chaîne numérique intégrée de haut niveau s'appuyant sur des informations génériques. C'est dans ce but qu'une nouvelle approche de programmation a émergé dans le courant des années 2000 – le langage STEP-NC (ISO 14649). Bien que la programmation avancée basée STEP-NC ne soit pas encore présente dans l'industrie, ces travaux intéressent grandement certains industriels. Ce qui en témoigne l'implication de l'équipe de recherche au sein du projet européen FP7 FoFdration, porté par Airbus.

De plus, un intérêt est porté à l'utilisation de machine à commande numérique ouverte afin de répondre au besoin de répartir l'intelligence décisionnelle (du point de vue génération de trajectoire) entre les modules CAO/FAO et le directeur de commande numérique.

Dans ce cadre, la problématique succinctement associée est d'étendre les capacités du directeur de commande numérique en permettant l'optimisation et la génération de trajectoires on-line. Dans ce document, suite à un état de l'art mettant en avant un besoin réel d'adapter une trajectoire de manière locale et globale au sein d'une MOCN, les avantages de combiner l'utilisation d'une CN ouverte et du langage STEP-NC sont illustrés.

2 Nécessité de la génération de trajectoire on-line

2.1 Etat de l'art du contrôle adaptatif dans le domaine de la fabrication

La communauté scientifique a débuté des recherches sur le contrôle adaptatif dès les années 1960, d'abord appliqué sur des systèmes à boucle fermée simple (de type échangeur de chaleur, refroidisseur) puis sur des applications plus complexes (autopilotage d'avions et de missiles dès 1977). Dans le domaine de la fabrication, afin d'expliquer simplement l'intérêt du contrôle adaptatif, une analogie est faite entre le problème de contrôle et l'action d'un opérateur au pied de la machine [1] :

- L'opérateur mobilise ses sens pour observer une opération de fabrication.
- A partir de son ressenti, il interprète le bon déroulement de l'opération.
- Si besoin, il modifie les paramètres de la machine pour augmenter ses performances.

Les paramètres qui gèrent le procédé de fabrication sont donc fixés au préalable de manière prudente puis optimisés en fonction de l'expérience de l'opérateur, ce qui donne des gains de productivité de 5 à 10% [2]. L'intérêt du contrôle adaptatif est donc de compléter et d'automatiser les actions de l'opérateur expérimenté, et l'analogie donne donc simplement :

- Utilisation d'un capteur pour le ressenti (Identification)
- Un modèle pour le bon déroulement de l'opération (Décision)
- Calcul des nouveaux paramètres et intégration (Modification).

Ceci peut être illustré de la manière suivante :

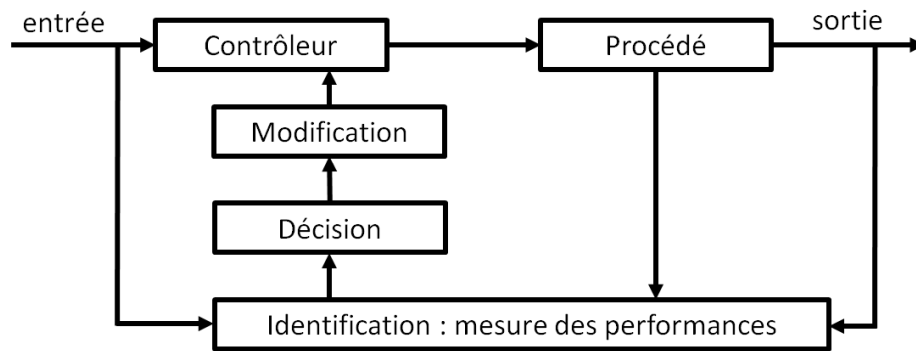


Fig. 1 : Contrôle adaptatif d'un procédé, figure reprise et traduite de [3]

L'état de l'art permet d'identifier et de synthétiser l'ensemble des informations observées jusqu'à maintenant lors d'un procédé de fabrication [2, 4-8] :

- les déformations élastiques de la pièce et de l'outil
- les déformations dues aux effets thermiques
- les vibrations
- l'usure d'outil
- les perturbations périodiques (jeu, éléments rotatifs non équilibrés)
- les efforts (pression en perçage, couple en tournage/fraisage)

Par le biais des informations relevées et par la connaissance du comportement du procédé de fabrication, de plus en plus pointue au fil des années, des modèles de description dynamique sont enrichis et intégrés dans des boucles de contrôle. Ces boucles de contrôle ne sont pas détaillées dans ce document, l'essentiel est de constater que bien souvent dans le domaine de la production, les paramètres modifiés pour optimiser le procédé se concentrent sur les consignes/gains des moteurs d'axes, ainsi que sur les paramètres liés au procédé (par exemple vitesse d'avance dans le cas de l'usinage).

Les différents travaux d'adaptation durant un procédé ont permis d'avoir un gain de productivité et de conformité [4] mais un champ reste encore peu exploré concernant les modifications de plus haut niveau, en particulier liés à la trajectoire générée par la FAO et à la géométrie réelle de la pièce à fabriquer.

2.2 Apport génération de trajectoires on-line

Dans la littérature concernant les contrôles adaptatifs, même quand il est explicitement question de GAC (Geometric Adaptive Control [4, 9-11]), les travaux sont axés sur les paramètres donnés précédemment et dans la boucle de position d'asservissement. Concernant la génération ou le choix d'une nouvelle trajectoire, une des premières applications est dans le domaine de la robotique, avec un robot PUMA, équipé d'une caméra externe, qui adapte ses trajectoires de prise et de pose en fonction des différentes géométries de pièces à assembler (Projet Apas [12]). Beaucoup de travaux sont menés dans le domaine de la robotique, mais les problématiques ne sont pas les mêmes. A partir d'une configuration initiale, d'une configuration finale voulue et d'un certain nombre de contraintes (obstacles, domaine articulaire), une trajectoire optimale est calculée.

Dans le domaine de la fabrication par machine outils, les contraintes sont plus importantes du point de vue respect de la géométrie sur l'ensemble de la trajectoire et la modification de trajectoire est plus difficile, dû aux architectures robustes et propriétaire des MOCN. L'intérêt n'est pas porté seulement sur une position initiale et finale mais bien sur l'ensemble des

points de la trajectoire. Dans ce domaine, il existe des travaux où la trajectoire est modifiée après inspection complète de la pièce fabriquée [1, 13], mais ceci est une modification de trajectoire off-line, qui permet la conformité de la pièce produite, mais améliore difficilement la productivité. Dans le domaine du off-line, T. I. Seo propose par exemple une méthode de génération de trajectoires permettant de prévoir et corriger les défauts à la flexion de l'outil lors d'usinage en flanc [14, 15]. Concernant les travaux axés sur une modification on-line, seul des transformations rigides sont apportées à la trajectoire (translation, par changement de la jauge outil par exemple) [16].

Il existe donc un besoin réel qui consiste à prendre en compte les conditions réelles de réalisation d'une pièce, et plus particulièrement la géométrie réelle d'une pièce lors du process de fabrication, afin de générer une trajectoire optimale « on-line », dans le but d'obtenir une pièce toujours conforme. Ce besoin peut être comblé par l'apport combiné des possibilités d'une commande numérique ouverte et de l'utilisation du langage STEP-NC.

3 Possibilités d'une commande numérique ouverte dans un environnement de programmation avancée STEP-NC

3.1 Commande numérique ouverte

Le choix de l'utilisation d'une commande numérique ouverte est pris dans le but de surmonter les limitations des architectures propriétaires (dont les composants et fonctionnement classiques ne seront pas rappelés dans ce document) tel que [17-19] :

- Pas de retour direct des données de process, donc un contrôle en ligne difficile,
- Difficultés à s'adapter aux fréquences de mises à jour liées aux besoins
- Formats mathématiques de description des trajets pas totalement normalisés
- Méconnaissance des algorithmes internes d'interpolation
- Manque de possibilités d'action en temps réel

En effet, une commande numérique ouverte de par son infrastructure modulaire (figure 2-a) et ses critères de définition (Figure 2-b) ouvre des possibilités de programmation avancée, qui sont présentées dans cette section.

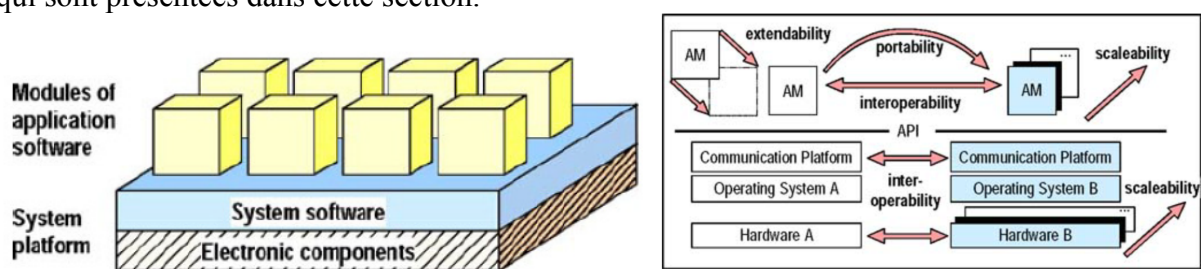


Fig. 2 : a- Infrastructure modulaire d'une CN ouverte [20], b- Critères de définition d'une CN ouverte [20]

Il existe un grand nombre de projets de commande numérique ouverte, comme OSEC, JOP, LinuxCNC ou OSACA, qui ont déjà été comparés. Les avantages et inconvénients de chacun ne font pas l'objet de ce document [20, 21]. Concernant les travaux présentés dans ce document, le logiciel de commande numérique utilisé est LinuxCNC (anciennement EMC, Enhanced Machine Controller [22]). Ce dernier est implanté dans une machine-outil de taille industrielle, 3-axes, Cincinnati Milacron 'Sabre', qui a été configurée pour fonctionner avec

différentes commandes numériques (deux propriétaires, NUM et FIDIA (nC 12) et une ouverte LinuxCNC) (figure 3) [17].



Fig. 3 : Vue d'ensemble de la plateforme de l'IRCCyN

Par ailleurs, le fait de pouvoir passer d'une commande propriétaire à une autre est particulièrement intéressant dans la situation actuelle où les industriels doivent être convaincus des avantages d'une commande numérique ouverte, de l'ajout d'algorithmes avancée ou d'intégration de nouveau langage tels que le STEP-NC, car les bénéfices sont alors démontrables sans pour autant perdre les fonctionnalités de la machine initiale. De cette manière, il est possible d'évaluer l'impact de la CN du fait que la partie opérative reste identique. Cette plateforme est d'ailleurs utilisée dans le cadre du projet européen FoFdration (FP7 – Foundation for the Sustainable Factory of the Future) [17].

Il est utile de préciser que la plateforme respecte toutes les définitions de la norme de systèmes ouverts (IEEE 1003.0) [23], synthétisable de la manière suivante :

- Portabilité (Portability) : Capacité à être exécuté sur différents systèmes par le biais de Linux (Système ouvert).
- Interopérabilité (Interoperability) : Communication logiciels mais aussi matériels (de différents fournisseurs) par le biais de Profibus + HAL (Hardware Abstraction Layer, soit une couche de connexion de modules) de LinuxCNC.
- Evolutivité (Scaleability) : Capacité d'être étendu à plus de machines. Caractère reproductible d'une installation (Possible dans le cas de l'installation de l'IRCCyN).
- Extensibilité (Extensibility) : Possibilité de rajouter des éléments, par exemple des algorithmes, LinuxCNC en lui-même (et des plateformes telles que SPAIM dans le cas de l'IRCCyN).

Afin d'illustrer le critère d'extensibilité d'une CN ouverte, une interpolation NURBS, encore peu présente au sein des commandes numériques propriétaires, a été intégrée au sein de la plateforme de l'IRCCyN. Cette intégration permet d'aller dans le sens de l'homogénéisation de l'ensemble des données de description de la chaîne numérique. Le format de description au sein de la CN est maintenant le même que le format de description du modèle CAO. Ceci est illustré dans le cas de la description de la géométrie de pièce test 4-vagues [24] (qui présente l'intérêt d'avoir différentes courbures, difficiles à interpoler en linéaire ou par arcs de cercle).



Fig. 4 : Pièce 4-vagues (à gauche), géométrie CAO de la 4^{ème} vague sous Rhino (au milieu) et visualisation de la trajectoire sous LinuxCNC

La plateforme présente aussi l'intérêt de pouvoir comparer sur une même machine-outil, les performances de différentes commandes numériques. Des essais ont permis de démontrer que LinuxCNC est tout aussi fonctionnel que FIDIA, voire même plus performantes (N.B. : Les résultats sont donnés dans le cadre précis des réglages de la plateforme de l'IRCCyN et sont donc extrinsèques) :

- Temps d'exécution sur LinuxCNC 20% plus rapide que sur FIDIA (voir Figure 5)
- Fonction d'arrêt précis/lissage (G61/64) possible sur LinuxCNC, non existant sur FIDIA
- Visualisation du parcours et réglage des décalages plus intuitif sur l'interface LinuxCNC

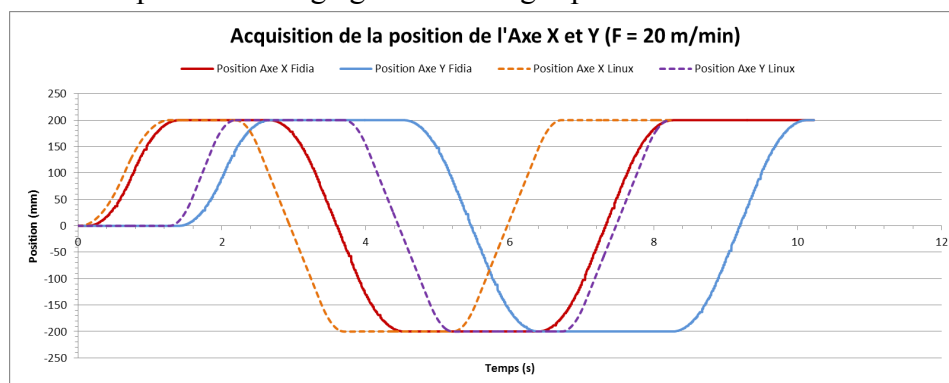


Fig. 5 : Exemple d'acquisition de positions pour un même programme (Carré 400mm de coté) sous LinuxCNC ($T_{\text{exécution}} = 8s^*$) et FIDIA ($T_{\text{exécution}} = 10s^*$).

*Les fréquences d'échantillonnages sont différentes pour chaque CN (910Hz pour LinuxCNC, 500Hz pour FIDIA), cependant les résultats sont bien représentés sur une même échelle de temps.

Les différences de performances sont observables par acquisitions directes des données de positions et vitesses, mais aussi par essais classique par système Ballbar télescopique (RENISHAW). L'analyse des résultats montre les différences suivantes :

- LinuxCNC plus performante au niveau des jeux à l'inversion (-27% d'erreurs), des pics d'inversion (-82%), de l'équerrage (-21%), de la rectitude sur Y (-14%) et de la circularité (-20%)
- FIDIA plus performante au niveau des jeux latéraux (-18%), des erreurs cycliques (-23%), de la rectitude sur X (-31%) et de la différence d'échelle (-15%)

De plus, en termes de fonctionnalités de LinuxCNC, il est aussi possible de modifier directement les caractéristiques machines au sein de la CN afin de modifier les performances dynamique, par exemple en doublant l'accélération maximale sur les axes X et Y.

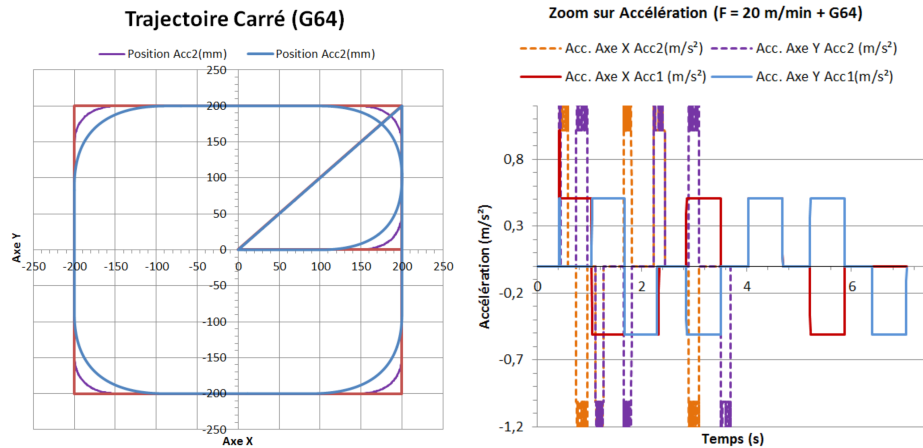


Fig. 6 : Exemple d'acquisition de positions et d'accélération (dérivées de vitesses acquises) pour une accélération de 1m/s^2 et 2m/s^2 .

Au sein de cette commande numérique ouverte entièrement fonctionnelle, quels sont donc les possibilités de modifications de trajectoire ? La réponse est entièrement liée au caractère transparent et modulaire de LinuxCNC. Dans celui-ci, il est essentiel de préciser que la machine-outil est entièrement modélisée et paramétrée à travers un certain nombre de modèles, définissant par exemple les caractéristiques cinématiques de la machine (vitesses, accélérations par axes, ...). Des caractéristiques qui sont ensuite prises en compte dans les algorithmes internes d'interpolation. Il est par exemple possible de simuler le parcours d'une trajectoire en prenant en compte la dynamique (accélération) de la machine. Les temps de parcours calculés en simulation sont d'ailleurs très proches des temps réels (écarts inférieurs à 5%.)

L'idée des travaux présentés, dans le cadre de la modification de trajectoire on-line, est de définir une entrée fictive, sous la forme d'un $n^{\text{ième}}$ axe qui traduirait une modification de géométrie réelle de la pièce. La cinématique de la machine est alors différente, et à partir d'un même programme, le parcours exécuté est différent. Ceci donne la possibilité d'un changement de haut niveau, avant même de rentrer dans la boucle d'asservissement en position, l'interpolation et le positionnement de l'axe outil s'adapte.

En ajoutant un axe fictif, il est donc possible de prendre en compte une modification de la position de la pièce, et donc d'adapter sous forme globale la trajectoire (rotation et translation de la trajectoire) en temps réel. La méthodologie d'intégration et d'expérimentation envisagée est présentée dans la section 4 de ce document.

Dans la section ci-après sont présentées les possibilités de modifications locales de la trajectoire à l'aide du format STEP-NC.

3.2 STEP-NC et SPAIM

L'objectif premier du format STEP-NC (ISO 14649) est d'améliorer la communication entre l'ensemble CAO/FAO et la commande numérique. Ce langage permet l'utilisation de fonctions avancées de programmation grâce à la description orientée entité de la pièce à fabriquer [25]. Le secteur industriel montre un intérêt grandissant envers ce type d'approche, comme en témoigne, par exemple, le projet européen FoFdration. C'est dans ce cadre que l'équipe de l'IRCCyN a créé la plateforme SPAIM (STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing) [26] qui peut être implémentée sur la plupart des MOCN de l'industrie, et qui a déjà été implanté sur trois machines du laboratoire.

L'approche d'intégration du langage STEP-NC suit trois niveaux de complexité croissante (fig. 7) :

1- Niveau indirect : Un interpréteur est ajouté à une commande numérique pour traiter un fichier STEP-NC. Le Code-G devient transparent, mais tous les avantages du STEP-NC ne sont pas exploitables.

2- Niveau interprété : Le format STEP-NC est directement compréhensible et exécuté sur les commandes d'axes. Des données extérieures peuvent être prises en compte pour générer une trajectoire optimale.

3- Niveau adaptatif : Permet la modification en temps réel de la trajectoire outil et des paramètres machines.

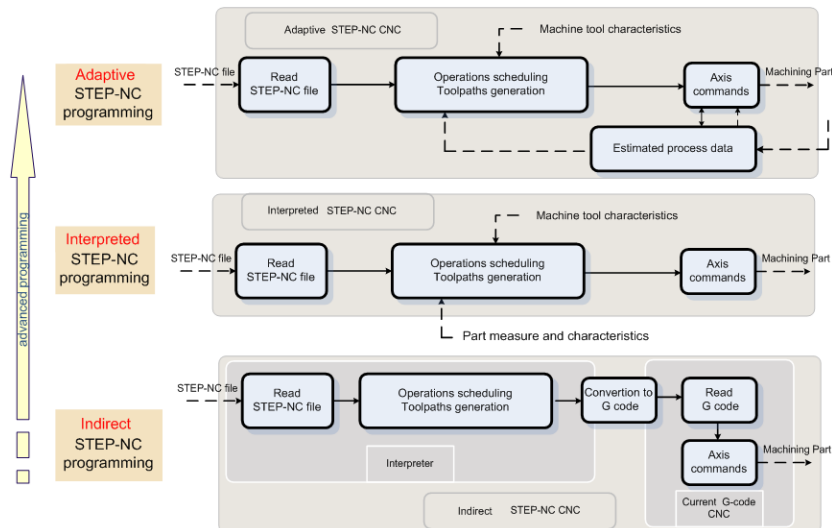


Fig. 7 : Les différents niveaux d'intégration du langage STEP-NC au sein de la plateforme SPAIM [26]

Lors du développement de la plateforme SPAIM, les possibilités de modification de trajectoire sont prises en compte dans le dernier niveau d'intégration. Cependant ce niveau reste difficilement atteignable avec une commande numérique à architecture propriétaire et plus accessible au sein de la CN ouverte LinuxCNC.

Par la structure même de description du langage STEP-NC, les paramètres suivants peuvent être modifiés :

- la géométrie de la pièce localement (déformation), et donc la trajectoire outil
- la géométrie globale de la pièce (facteur d'échelle)
- le repérage de la pièce (transformation globale de position et orientation)

Dans la section ci-après sont présentées les expérimentations envisagées sous forme de perspectives.

4 Méthodologie d'expérimentation

La problématique de calcul de nouvelle trajectoire est volontairement simplifiée pour se concentrer sur l'intégration même de cette trajectoire.

Les différentes expérimentations envisagées sont de difficultés croissantes et la méthodologie d'intégration est exposée de manière graduelle ci-dessous :

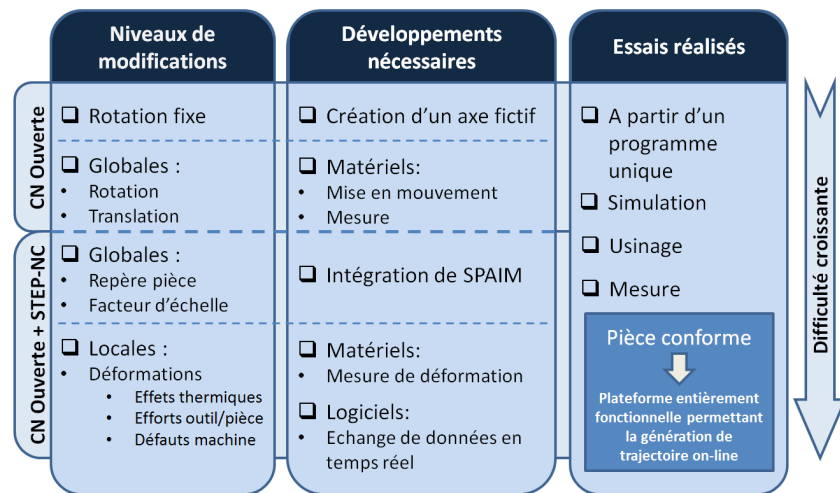


Fig. 8 : Méthodologie d'expérimentation de la prise en compte de modifications on-line

Les premières étapes d'expérimentations concernent exclusivement les possibilités d'une CN ouverte pour changer une trajectoire en temps réel. Avec un programme unique, mais un environnement d'usinage changeant, l'objectif est d'obtenir une pièce toujours conforme. Le niveau des modifications de l'environnement est graduel, tout d'abord globales avec les possibilités seules d'une CN ouverte, les modifications deviennent locales par l'ajout des possibilités du langage STEP-NC. A l'aboutissement de la mise en œuvre de cette méthodologie, la plateforme est alors entièrement fonctionnelle et permet la génération de trajectoire on-line.

5 Conclusion

Toute l'originalité des travaux présentés dans cet article se base sur l'utilisation combinée des possibilités des commandes numériques ouvertes et du langage STEP-NC dans le cadre de la génération de trajectoire on-line. Les commandes numériques ouvertes permettent d'intégrer et de prendre en compte les transformations rigides de la pièce (translation et rotation) tandis que le STEP-NC permet une modification des entités de la pièce pour des prises en compte de transformations à la fois locales (déformations) et globales (facteurs d'échelle). Cette ensemble donne donc un rôle décisionnel plus conséquent à la commande numérique et facilite grandement l'obtention d'une pièce conforme, diminue les interventions spontanées en pied de machine, le nombre de rebus et de reprise de pièce, et augmente ainsi considérablement la productivité.

Références

- [1] P. A. MUELLER, 1972, *Trainable Adaptive Control for Automated Machining*, SME, MS72-132, p. 1-16.
- [2] Y. KOREN, F. RASMUSSEN, 1983, *Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools*, ASME, Volume 105, p. 107-112.
- [3] M. P. GROOVER, 1970, *A Definition and Survey of Adaptive Control Machining*, SME, MS70-561, p. 1-27.
- [4] L. LIU, N. SINHA, M. ELBESTAWI, 1989, *Adaptive control for geometric tracking in turning*, Computers in Industry, 11, p. 147-159.
- [5] T. WATANABE, S. IWAI, 1983, *A control system to improve the accuracy of finished surfaces in milling*, Trans. ASME Dynamic Systems, Measure and Control, 105, p. 192-199.
- [6] C. A. HUDSON, 1982, *Computers in Manufacturing*, Sciences, 215, p. 818-825.

- [7] M. RAUCH, 2007, *Optimisation de la Programmation des MOCN – Application aux Machines à Structure Parallèle*, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MTGC.
- [8] M.-Y. YANG, T.-M. LEE, 2002, *Hybrid adaptive control based on the characteristics of CNC end milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(4), p.489-499.
- [9] Y. SUN, Y. BAO, K. KANG, D. GUO, 2013, *An adaptive feedrate scheduling method of dual NURBS curve interpolator for precision five-axis CNC machining*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68(9-12), p.1977–1987.
- [10] M. SHIRAISHI, 1984, *Geometrical Adaptive Control in NC Turning Operation*, J. Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol. 106, p. 75-80.
- [11] J. PEKLENIK, 1970, *Geometric Adaptive Control of Manufacturing Systems*, Ann. CIRP, Vol. 18, No. 1, p. 265-274.
- [12] R. SUGARMAN, 1980, IEEE Spectrum 17, 53.
- [13] F. ZHAO, X. XU, S. XIE, 2008, *STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 24, p. 200-216.
- [14] T. I. SEO, P. DÉPINCÉ, J.-Y. HASCOËT, 1997, *Paths Compensation for Tool Deflection in End Milling*, Ifac-Ims Intelligent Manufacturing Systems, Seoul (Korea), July 21-23
- [15] T. I. SEO, 1998, *Intégration des effets de déformation d'outil en génération de trajectoires d'usinage*, Thèse de doctorat, Université de Nantes / Ecole Centrale de Nantes
- [16] F. POULHAON, M. RAUCH, A. LEYGUE, J.-Y. HASCOËT, F. CHINESTA, 2014, *Toward a Real Time Control of Toolpath in Milling Processes*, Key Engineering Materials, 554-557, p. 706–713.
- [17] M. RAUCH, J.-Y. HASCOËT, V. SIMOES, K. HAMILTON, 2014, *Advanced programming of machine tools : interests of an open CNC controller within a STEP-NC environment*, International Journal Machining and Machinability of Materials, Vol 15, p. 2-17.
- [18] X.W. XU, S.T. NEWMAN, 2006, *Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent—a review of the technologies*, Computers in Industry, 57(2), p. 141-152.
- [19] X. BEUDAERT, 2013, *Commande numérique ouverte: interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexe*, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale EDSP
- [20] G. PRITSCHOW, Y. ALTINTAS, F. JOVANE, 2001, *Open controller architecture—past, present and future*. CIRP Annals, p.NC
- [21] J. NACSA, 2001, *Comparison of three different open architecture controllers*, Proceedings of IFAC MIM, p. 134-138.
- [22] W. P. SHACKLEFORD, F. M. PROCTOR, 2001, *Use of open source distribution for a Machine tool Controller; Sensors and controls for intelligent manufacturing*, Conference, Boston MA , USA, vol. 4191, p. 19-30
- [23] P. MILLES, 1998, *Open architecture: forecasting the adoption wave*, Robotics World, Vol 16 (2), p. 23-29
- [24] A. DUGAS, J.J. LEE, M. TERRIER, J.-Y. HASCOËT, 2002, *Virtual Manufacturing For High Speed Milling*, 35th Cirp Intern. Seminar On Manufacturing Systems, Seoul (Korea), p 199-205.
- [25] M.J. PRATT, 2001, *Introduction to ISO 10303---the STEP Standard for Product Data Exchange*, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 1(1), p. 102-103.
- [26] M. RAUCH, R. LAGUIONIE, J.-Y. HASCOËT, 2009, *STEP-NC, Enhancing CNC manufacturing interoperability with STEP-NC*, Journal of Machine Engineering 9, 4, p. 26-37.